

五包合浇生产 122 t 葛洲坝转轮体铸件

杨程坤¹, 叶文辉², 吴仁贵², 杨茂一¹

(1. 辽宁福鞍重工股份有限公司, 辽宁鞍山 114016; 2. 中国铸造协会, 北京 100084)

摘要: 基于葛洲坝水电站转轮体的结构特点及冶炼设备和天车起吊能力, 制定了5包合浇、2包补浇冒口的浇注工艺及在地坑中于880~900 °C切冒口的打箱工艺。通过空包演练浇注过程, 确定了每包出钢、保温和浇注的时间, 成功浇注了净重122 t的葛洲坝水电站转轮体; 采用地坑中热切冒口、利用余热退火工艺, 弥补了天车能力不足, 保证了铸件的顺利生产。

关键词: 5包合浇; 转轮体; 冒口补浇; ZG20MnSi

1 葛洲坝转轮体技术要求

水力发电是清洁能源的主力军, 近年来大型化轴流水电机组得到了较快的发展^[1-2]。转轮体是轴流机组的核心部件, 内部质量要求较高。葛洲坝转轮体精加工后的重量122 t, 轮廓尺寸 $\Phi 4\ 213\ \text{mm}$, 高度3 390 mm, 壁厚200~400 mm。材质为ZG20MnSi, 具体化学成分要求如表1所示, 力学性能要求如表2所示。

表1 转轮体化学成分要求
Table 1 Chemical Composition requirements of the Hub

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
0.16~0.22	0.60~0.80	1.00~1.30	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.35	≤ 0.40	≤ 0.20	≤ 0.40	≤ 0.05

表2 转轮体力学性能要求
Table 2 Mechanical properties requirements of the hub

牌号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	硬度 HB	冲击韧性 A_{kv}/J	弯曲试验 (90°)
ZG20MnSi	≥ 295	≥ 510	≥ 14	≥ 30	≥ 156	≥ 39	无裂纹

2 技术难点分析

2.1 多包合浇

铸件质量大, 需要多包合浇才能实现生产。转轮体的结构如图1所示。供货技术协议要求所有表面进行超声波和磁粉探伤, 按照《水力机械铸钢件检验规范》CCH70-3中的超声波探伤3级标准验收。转轮体的工艺设计结果表明需要5包合浇+2包补浇冒口的浇注工艺才能实现生产。我公司的冶炼设备只有一台30 t电弧炉和一台45 t钢包精炼炉共2个冶炼工位, 因此, 合理安排每包钢液的冶炼时间、精炼时间、出钢温度、化学成分、浇注温度是5包合浇成功的关键。

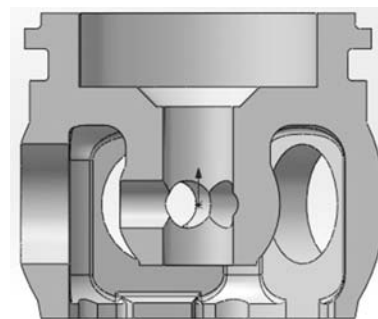


图1 转轮体剖面图

Fig. 1 Profile sketch of the runner hub

作者简介:

杨程坤(1984-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为大型铸钢件铸造工艺研发和产品质量控制。电话: 13841257329, E-mail: yck919@163.com

中图分类号: TG26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1649-04

收稿日期:

2023-04-25 收到初稿,
2023-06-14 收到修订稿。

2.2 座包浇注风险较大

由于起吊设备有3台天车，数量不能满足5个吊包浇注，所以需要有2个钢包座在砂型上浇注。座包的钢液温度控制最为关键，如果钢液温度过高，铸件的偏析程度较大，影响铸件的使用性能；如果钢液温度过低，打不开滑动水口，则造成铸件浇注失败。所以需要根据整个熔炼和浇注工艺方案，确定座包的出钢温度。

2.3 天车负荷能力不能满足常规打箱

打箱环节最关键的两个因素是天车的负荷能否大于铸件的重量及铸件的打箱温度。浇注钢液总重270 t，而2台天车的最大负荷只有205 t，不能满足整个铸件起吊的要求，无法实现常规打箱。所以需要考虑在地坑中切掉冒口。而切割冒口的时机和温度控制又直接影响了铸件的质量。如果温度控制不合适，铸件会有开裂的风险。

2.4 冷却时间长，不能满足交付要求

根据传统经验，ZG20MnSi铸件打箱温度应低于200℃，但这需要的冷却时间将长达55天，不能满足交付周期，因此需要考虑合适的打箱工艺，在保证铸件质量的前提下，缩短在砂型中缓冷的时间。

3 浇注工艺设计

3.1 浇注工艺参数

转轮体毛重145 t，浇注钢液总量270 t。为了保证钢液在型腔中的上升速度 $\geq 10 \text{ mm/s}$ ^[3]，需要5包同时浇注，而且每个钢包安装 $\Phi 90 \text{ mm} + \Phi 80 \text{ mm}$ 两个浇口，浇注温度为 $1560 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用底注式浇注系统，设置10道 $\Phi 100 \text{ mm}$ 直浇道， $\Phi 100 \text{ mm}$ 环形横浇道，开设24道 $\Phi 80 \text{ mm}$ 内浇道。各浇注系统截面积比例为： $\Sigma A_{\text{包}} : \Sigma A_{\text{直}} : \Sigma A_{\text{横}} : \Sigma A_{\text{内}} = 1 : 1.38 : 2.76 : 2.12$ 。

3.2 时间节点和温度控制

浇注成功的前提是5包钢液在浇注前成分、温度、钢液量符合浇注要求，并且到达浇注位置，具备浇注的条件。所以，每包的时间节点和温度控制是最关键的，如果安排不合理，任何一个差错都可能导致浇注失败。需要利用时间和温度差合理安排每个钢包在电炉和精炼的时间段。5包钢液的时间节点和温度控制如表3所示。

3.3 熔炼工艺

为了保证铸件质量要求，每包钢液需要EAF+LF进行精炼。电炉采用氧化法生产，要求熔毕碳 $\geq 0.50\%$ ，加强炉渣的处理，防止渣量太大而影响操作，电炉出

表3 5包钢液时间节点和温度控制
Table 3 Time and temperature parameters of the 5 ladles

序号	出钢量/t	电炉冶炼时间	LF精炼时间	过跨温度/ $^\circ\text{C}$
1	42	17: 00—19: 30	19: 40—22: 30	1 585
2	42	19: 50—22: 20	22: 35—23: 45	1 615
3	42	22: 30—01: 00	01: 10—02: 30	1 585
4	40	02: 30—04: 50	05: 00—06: 20	1 615
5	40	05: 30—09: 00	09: 10—10: 40	1 605~1 615

钢时目标值为 $P \leq 0.015\%$ 。

还原剂采用硅钙粉等。要求精炼白渣操作（白渣碱度3~4，CaO含量约60%），且渣中 $\text{FeO} \leq 0.50\%$ ，保持时间25 min以上，白渣生成后出钢前全程保持白渣，取双样确认 FeO 数值。为了使得白渣形成后保持的时间满足工艺要求，送交调度室的渣样要可靠、有代表性；多包合浇的炉次，要在返回加热期间蘸取渣样进行目视复检。

S目标值为 $\leq 0.015\%$ ；如C较低，可以使用高碳锰铁或增碳剂进行增碳，目标C含量为0.18%~0.22%，喂CaSi线3米/吨钢。精炼炉出钢温度测双温，温差 $\leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 方可出钢。出钢温度根据铸件浇注位置及件数适当调整。

钢液在炉外等待期间每15 min氩气搅拌一次，并在测温点加入硅钙粉及铝粉进行保温，进入精炼炉加热前要压开渣壳。

炉后班组检查好各包的引流、压棒位置、跳板，尤其是座包的压棒高度，确认并签字，准备好氩气带。引流结束后，为了防止浇注时打不开滑动浇口，在浇注前为各包准备一套备用的氧气带、氧熔管。

炉后安装完滑板后，要检查滑板透气塞透气良好，滑件机构开关自如，无阻碍。钢包烘烤时间要求保证4 h，钢包温度 $\geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ，尤其是第4、5包。

3.4 5包合浇工艺

五包同时浇注，两个坐包，三个吊包。5个钢包的位置和浇注系统如图2所示。浇注前10个浇口杯放置

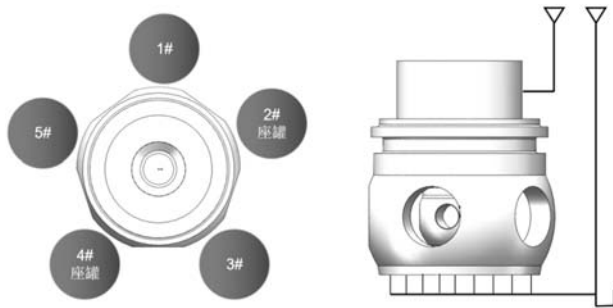


图2 钢包位置和浇注系统设计示意图

Fig. 2 Sketch of pouring system and the location of each ladle

铝帽子。放置好引流用的渣斗，并做好引流的准备工作。

浇注顺序如下：

(1) 首先将2#钢包吊至浇注位置附近，引流结束后将2#钢包底部的2个出钢口对准浇口杯，然后放置到包座上；

(2) 将4#钢包吊至浇注位置附近，引流结束后将4#钢包底部的2个出钢口对准浇口杯，然后放置到包座上；

(3) 陆续将1#、3#、5#钢包吊至浇注位置附近，引流结束后将钢包底部的2个出钢口对准浇口杯，两位工人做好开浇准备；

(4) 依次打开1#、2#、3#的钢包的6个浇口，半流浇注，等型腔底部充满钢液后开全流浇注；

(5) 待液面上升到轴孔位置，同时打开4#、5#钢包的浇口，直至钢液上升到冒口高度600 mm，停止浇注，并向冒口中加100 mm厚的碳化稻壳。

3.5 补浇冒口

5包合浇完成后45 min~1 h内出钢32 t，首次补浇冒口，2 h后出钢25 t二次补浇冒口，补浇温度1 590~1 600 ℃。覆盖剂采用碳化稻壳，每次补浇后，添加碳化稻壳，保证碳化稻壳的厚度200~300 mm，冒口顶部不能裸露钢液。

4 打箱工艺要点

4.1 热切冒口

热切冒口最安全的温度点是在 A_{C3} 以上，此时铸件的组织是奥氏体，没有开裂的风险；同时还需要考虑铸件有一定的强度，能够吊起冒口而不至于在吊把根部变形导致冒口掉落砸伤铸件的风险。该材质的 A_{C3} 约为850 ℃^[4]，因此选择热切冒口的温度为880~900 ℃，根据数值模拟的冷却时间，浇注完成后2周具备热切冒口的条件。提前一周进行冒口根部测温，每次测温结束后用砂子覆盖冒口根部，保证砂层厚度不低于100 mm。待冒口根部温度到达900 ℃时，在距离冒口根部约300 mm的地方使用氧熔管切割，切割完成后，吊起冒口，确保冒口全部脱离铸件，之后再将冒口放回原位，使用余温对切口部位进行退火处理，进一步降低铸件开裂的风险。

4.2 打箱温度

转轮体的材质为ZG20MnSi，由于重量较大，冷却时间太长，而过早打箱可能会导致铸件产生变形甚至撕裂的风险，因此测试了该材质在不同温度下的铸态强度，如图3所示。

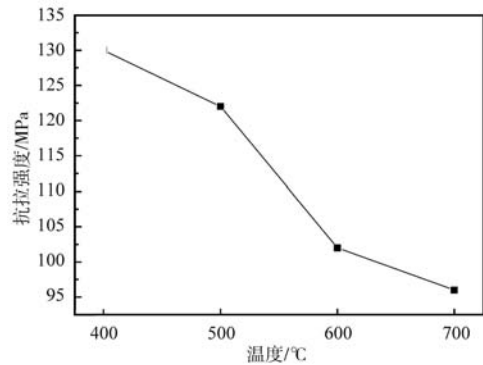


图3 ZG20MnSi在不同温度下的强度

Fig. 3 Strength of ZG20MnSi at different elevated temperatures

从图3可以看出，该材质在600 ℃的铸态抗拉强度仍然能够超过100 MPa，而且此温度高于铸件回火温度（580 ℃），所以选择600 ℃打箱是可以的，和冷却到100 ℃以下打箱相比，能够节省约30天的时间。

打箱时先将转轮体垂直吊出砂型约500 mm，此时铸件的表面呈暗红色。清理铸件内腔的砂芯和芯骨，避免铸件加热时芯子阻碍铸件膨胀。待表面暗红色消失后，即表面温度降低到500 ℃以下时，将转轮体吊到热处理炉中进行热处理。由于该转轮体的最大热节圆处壁厚超过800 mm，而且此处还需要超声波检查，所以需要2次正火后晶粒度才能满足超声波检查的要求。而采用在双相区进行二次正火的工艺可以显著细化晶粒^[5]，因此，转轮体的热处理工艺如图4所示。

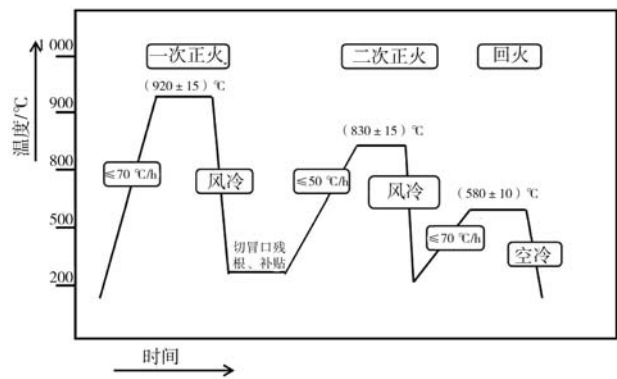


图4 转轮体热处理工艺

Fig. 4 Heat treatment process of the runner hub

5 研制结果

哈尔滨电机厂总需求8件，原计划给我公司2件的订单。转轮体交付后，由于质量好，交付周期快，我公司又获得了5件葛洲坝水电站转轮体的订单，使用此工艺共生产了7件葛洲坝水电站转轮体铸件（图5），每件产品的内部质量均满足了CCH70-3的3级探伤要求。



图5 葛洲坝转轮体成品

Fig. 5 Picture of the finished runner hub

6 结语

采用5包合浇、2包补浇冒口的工艺方案是可行的，通过合理设置浇注系统、确定每包钢液的出钢温度、浇注温度和开浇时间，成功浇注了净重122 t的转轮体；浇注后凝固冷却过程中，在 A_{C3} 以上温度热切冒口，并将冒口放回原位置继续冷却，保证了铸件质量，也解决了天车起重能力不足的问题；采用在600 °C热打箱的方式，能够缩短生产周期；由于铸件壁厚超过800 mm，需要采用二正一回的热处理方式细化晶粒。

参考文献:

- [1] 梁敏, 贾冠飞, 周璟, 等. 大型转轮体铸造工艺 [J]. 铸造, 2019, 68 (7): 773-776.
- [2] 林雪健, 黄宏军, 王浩磊, 等. 水轮机转轮体铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2018, 67 (1): 41-44.
- [3] 第一重型机器厂, 哈尔滨工业大学. 大型铸钢件生产 [M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1979.
- [4] 周晓锋, 刘战英. 钒对20MnSi钢组织和CCT曲线的影响 [J]. 钢铁研究, 2006 (5): 10-12.
- [5] 石磊. 低合金高强度钢相变行为及两相区热处理工艺的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.

Production 122 Tons of Gezhouba Runner Hub Casting by 5 Ladles Combined Pouring

YANG Cheng-kun¹, YE Wen-hui², WU Ren-gui², YANG Mao-yi¹

(1. Liaoning Fuan Heavy Industry Co., Ltd., Anshan 114016, Liaoning, China; 2. China Foundry Association, Beijing 100084, China)

Abstract:

Based on the structural characteristics of runner hub used for Gezhouba hydropower station, the capacity of smelting equipment and the lifting capacity of crane, the pouring process of 5 ladles combined pouring and then 2 ladles pouring in the riser was practiced and cutting the riser in the pit at 880-900 °C are formulated in this paper. The parameters of tapping, re-heating and pouring for each ladle was determined via the pouring process with 5 empty ladles, then the runner hub with net weight of 122 tons was successfully poured. Cutting riser in the pit and the annealing process was performed to make up for the shortage of crane capacity and ensure the smooth production of castings.

Key words:

5 ladles pouring; runner hub; riser teeming; ZG20MnSi
